

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.311

В.В. Літвінов

## ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ЇХ СТАТИЧНУ СТІЙКІСТЬ

### Вступ

У сучасних умовах, коли стан електроенергетичної системи характеризується напруженим режимом роботи внаслідок того, що більша частина робочого обладнання, в тому числі й асинхронні двигуни, відпрацювала свій ресурс, гостро постає проблема надійної роботи відповідальних споживачів електроенергії підприємств з неперервними технологічними процесами. Для потужних промислових підприємств із складними та неперервними технологічними процесами, системи електропостачання яких характеризуються значною енергоемністю та великим навантаженням двигунів, актуальною є проблема стійкості її вузлів [1].

В [1] розглянуто вплив параметрів енергосистеми на стійкість вузлів навантаження з асинхронними двигунами. У цьому дослідженні енергосистему подано множиною параметрів, до якої входять еквівалентні ЕРС прямої та зворотної послідовності та еквівалентний комплексний опір. В [1] проведено дослідження стійкості роботи навантаження в симетричних аварійних та післяаварійних режимах, які є найважчими, внаслідок чого ЕРС зворотної послідовності не було враховано. Однак слід зазначити, що найпоширенішими (до 90 % випадків) є саме несиметричні аварійні режими та спричинені ними післяаварійні режими, при дослідженні яких обов'язково необхідно враховувати зворотну складову несиметричного режиму. У статті [2] проведено аналіз впливу напруги зворотної послідовності на кратність пускового та максимального моментів асинхронного двигуна, але при цьому не проведено аналіз її впливу на механічну характеристику асинхронного двигуна та запас його статичної стійкості. В [3] розраховано залежність ККД та коефіцієнта потужності асинхронного двигуна від коефіцієнта несиметрії трифазної системи напруг при різних значеннях навантаження на валу двигуна. В статті зазначено, що при збільшенні коефіцієнта несиметрії трифазної системи напруг зростає споживання двигуном активної та реактивної потужності, але

при цьому не проаналізовано кількісний вплив несиметрії напруги живлення на запас статичної стійкості асинхронного двигуна. Таким чином, враховуючи дослідження [1–3] та той факт, що несиметрія напруги живлення часто має місце в мережах промислових підприємств внаслідок великої кількості несиметричного однофазного навантаження, можна зробити висновок про актуальність дослідження впливу несиметрії напруги на стійкість асинхронних двигунів.

### Постановка задачі

Метою даної статті є визначення впливу несиметрії трифазної системи напруг, зокрема наявності напруги зворотної послідовності, на статичну стійкість асинхронного двигуна в тривалих робочих (несиметрія напруги у внутрішніх розподільчих мережах підприємства) та післяаварійних несиметричних режимах, які є наслідками несиметричних аварійних режимів в енергосистемі.

### Матеріали та результати дослідження

Дослідження статичної стійкості асинхронного двигуна проводилось за допомогою критерію стійкості для асинхронних двигунів [4]

$$\frac{dP}{ds} > 0, \quad (1)$$

де  $\frac{dP}{ds}$  — похідна від виразу електромагнітної потужності асинхронного двигуна по його ковзання.

Розглянуто режим роботи асинхронного двигуна при наявності несиметрії напруги асинхронного двигуна, яка виникла внаслідок несиметрії трифазної системи напруг на секції вузла навантаження, до якого підключено двигун, та внутрішньої несиметрії асинхронного двигуна. Оскільки асинхронний двигун працює з ізольованою нейтраллю, то будь-який несиметричний режим асинхронного двигуна можна вважати як сукупність трифазної системи напруг прямої послідовності та трифазної системи напруг зворотної послідовності. Нульова послідовність відсутня внаслідок відсутності шляху протікання струмів нульової послідовності.

Електромагнітний момент прямої послідовності та електромагнітна потужність прямої послідовності визначаються за допомогою формули Клооса [5]

$$M_{\text{ел1}}(s) = P_{\text{ел1}}(s) = \frac{U_{\text{пр}}^2 \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)}{\left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2}, \quad (2)$$

де  $M_{\text{ел1}}$  – електромагнітний момент прямої послідовності;  $P_{\text{ел1}}$  – електромагнітна потужність прямої послідовності;  $s$  – робоче значення ковзання;  $U_{\text{пр}}$  – складова напруги прямої послідовності у відносних одиницях;  $X_{\text{екв}}$  – еквівалентний індуктивний опір асинхронного двигуна;  $R_{\sigma}$  – активний опір розсіювання асинхронного двигуна;  $R_{lr}$  – активний опір обмотки ротора асинхронного двигуна.

Електромагнітний момент, який створений напругою зворотної послідовності, спрямований у бік, протилежний обертанню основного магнітного поля. Електромагнітний момент та електромагнітна потужність, створені напругою зворотної послідовності, описуються таким виразом:

$$M_{\text{ел2}}(s) = P_{\text{ел2}}(s) = \frac{-U_{\text{зв}}^2 \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)}{\left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2}, \quad (3)$$

де  $M_{\text{ел2}}$  – електромагнітний момент зворотної послідовності;  $P_{\text{ел2}}$  – електромагнітна потужність зворотної послідовності;  $s$  – робоче значення ковзання;  $U_{\text{зв}}$  – складова напруги зворотної послідовності у відносних одиницях; решта позначень така ж, як і в (2).

Розглянемо вплив несиметрії напруги, яка визначається як відношення модуля вектора напруги зворотної послідовності до модуля вектора напруги прямої послідовності (коефіцієнт несиметрії трифазної системи напруг становить  $K_{\text{несим2}} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$ ), на статичну стійкість

асинхронного двигуна. Для цього розглянемо частину механічної характеристики асинхронної машини в обох режимах на інтервалі  $s \in [0,1]$  для механічної характеристики насосного типу (рис.1). Оскільки електромагнітний момент оберненої послідовності направлено в той самий бік, що й механічний гальмівний момент, умова рівності моментів на валу асинхронного двигуна при наявності несиметрії напруги набуває такого вигляду:

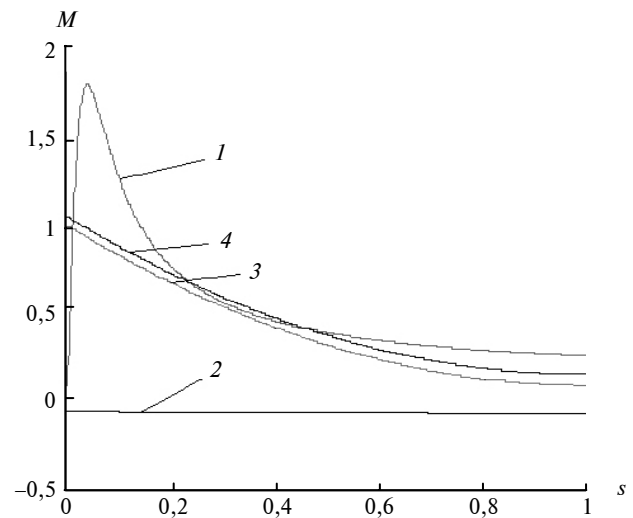


Рис.1. Механічна характеристика двигуна типу АН-15-64 при несиметрії напруги

$$M_{\text{ел1}} = M_{\text{мех}} + (-M_{\text{ел2}}), \quad (4)$$

де  $M_{\text{мех}}$  – механічний момент на валу двигуна.

Із врахуванням того, що у відносних одиницях  $P^* = M^*$ , перепишемо вираз (4) як баланс електромагнітної та механічної потужностей асинхронного двигуна:

$$P_{\text{ел1}} - (-P_{\text{ел2}}) = P_{\text{мех}}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{ел1}}$  – електромагнітна потужність прямої послідовності;  $P_{\text{ел2}}$  – електромагнітна потужність зворотної послідовності;  $P_{\text{мех}}$  – механічна потужність двигуна.

У розгорнутому вигляді з урахуванням (2) і (3) та поданням механічного моменту у вигляді насосної характеристики вираз (5) переписуємо так:

$$\begin{aligned} & \frac{U_{\text{пр}}^2 \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)}{\left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2} - \frac{U_{\text{зв}}^2 \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)}{\left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2} = \\ & = (P_{\text{ном}} - P_{\text{торк}})(1-s)^2 + P_{\text{торк}}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $U_{\text{пр}}$  – складова напруги прямої послідовності у відносних одиницях;  $U_{\text{зв}}$  – складова напруги зворотної послідовності у відносних одиницях;  $s$  – робоче значення ковзання;  $X_{\text{екв}}$  – еквівалентний індуктивний опір асинхронного двигуна;  $R_{\sigma}$  – активний опір розсіювання асинхронного двигуна;  $R_{lr}$  – активний опір обмотки ро-

тора асинхронного двигуна;  $P_{\text{ном}}$  – номінальний робочий механічний момент двигуна;  $P_{\text{торк}}$  – механічний момент торкання двигуна.

На рис. 1 наведено механічні характеристики двигуна типу АН-15-64 для значень напруги прямої послідовності  $0,9 U_{\text{ном}}$  (крива 1) та значення напруги зворотної послідовності  $0,3 U_{\text{ном}}$  (крива 2). Параметри заступної схеми асинхронного двигуна  $R_{\sigma}$ ,  $X_{\sigma}$ ,  $X_a$ ,  $R_{lr}$ ,  $X_{lr}$  розраховано за методикою [6]. Коефіцієнт завантаження двигуна дорівнює одиниці (крива 3). Еквівалентна механічна характеристика навантаження зображена кривою 4. З рисунка видно, що наявність напруги зворотної послідовності знижує запас статичної стійкості внаслідок підвищення моменту опору на валу двигуна.

Для проведення кількісного аналізу впливу несиметрії напруги асинхронного двигуна на запас його статичної стійкості застосовано критерій (1). Для цього визначено першу похідну лівої частини рівняння (6) по ковзанню  $s$ :

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{ел}}}{ds} &= \frac{d(P_{\text{ел1}} + P_{\text{ел2}})}{ds} = \frac{dP_{\text{ел1}}}{ds} + \frac{dP_{\text{ел2}}}{ds} = \\ &= \frac{U_{\text{пр}}^2 \left[ \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)^2 - X_{\text{екв}}^2 \right] R_{lr}}{\left[ \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2 \right]^2 s^2} + \\ &+ \frac{U_{\text{зв}}^2 \left[ \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)^2 - X_{\text{екв}}^2 \right] R_{lr}}{\left[ \left( R_{\sigma} + \frac{R_{lr}}{2-s} \right)^2 + X_{\text{екв}}^2 \right]^2 (2-s)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 2 наведено графічну інтерпретацію оцінки запасу статичної стійкості двигуна типу АН-15-64 за критерієм (7) для  $U_{\text{пр}} = 0,9 U_{\text{ном}}$  та

$U_{\text{зв}} = 0,3 U_{\text{ном}}$ . Отримана залежність  $\frac{dP}{ds}$  від  $s$  дає змогу визначити кількісний запас статичної стійкості асинхронного двигуна в області робочих ковзань.

За допомогою виразу (7) розраховано за-

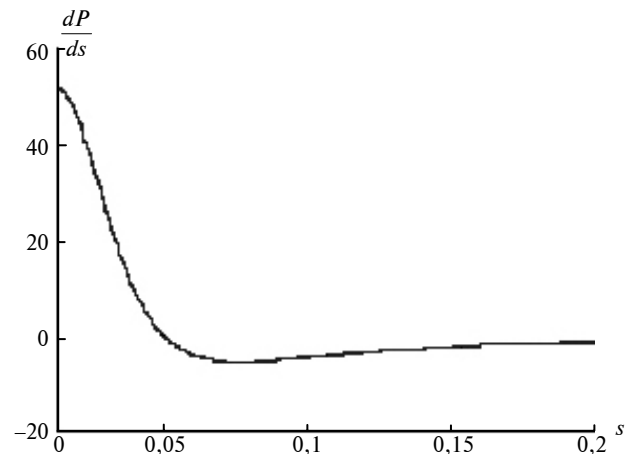


Рис. 2. Оцінка статичної стійкості двигуна типу АН-15-64

пас статичної стійкості асинхронного двигуна при несиметрії напруги живлення. Аналіз проведено для двох значень напруги прямої послідовності:  $0,9 U_{\text{ном}}$  та напруги, близької до критичної (для двигуна типу АН-15-64  $U_{\text{кр}} = 0,712 U_{\text{ном}}$ ). Для кожного з цих значень було вибрано ряд значень напруг зворотної послідовності від 0 до  $0,5 U_{\text{ном}}$  з інтервалом в 0,1 відн. од. Результати розрахунків наведено в таблиці

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок щодо впливу несиметрії трифазної системи напруг на статичну стійкість асинхронних двигунів. З теоретично підібраних несиметричних режимів очевидно, що сама напруга зворотної послідовності не дуже впливає на запас статичної стійкості асин-

**Таблиця.** Аналіз впливу несиметрії трифазної системи напруг на статичну стійкість асинхронного двигуна типу АН-15-64

$U_1$ , відн. од.	$U_2$ , відн. од.	$s_{\text{робоч}}$	$\frac{dP}{ds}$	$U_1$ , відн. од.	$U_2$ , відн. од.	$s_{\text{робоч}}$	$\frac{dP}{ds}$
0,9	0	0,014566	49,902	0,725	0	0,035134	2,479
0,9	0,1	0,014605	49,784	0,725	0,1	0,035638	2,093
0,9	0,2	0,014723	49,428	0,725	0,2	0,037551	0,744
0,9	0,3	0,014921	48,829	0,725	0,3	Re(0,04184)	-1,612
0,9	0,4	0,015203	47,977	0,725	0,4	Re(0,04096)	-1,209
0,9	0,5	0,015573	46,861	0,725	0,5	Re(0,03989)	-0,658

хронного двигуна. Однак при несиметричних режимах у трифазній системі напруг зменшується складова напруги прямої послідовності, що істотно знижує запас статичної стійкості асинхронного двигуна.

На рис. 3 зображено механічні характеристики асинхронного двигуна типу АН-15-64 у нестійкому режимі роботи для  $U_{пр} = 0,725U_{ном}$  і  $U_{зв} = 0,4U_{ном}$  (1 – електромагнітний момент прямої послідовності; 2 – електромагнітний момент зворотної послідовності; 3 – механічний момент навантаження; 4 – еквівалентний момент навантаження). З цього рисунка видно, що за відсутності зворотної послідовності режим роботи є стійким з невеликим запасом статичної стійкості  $\left(\frac{dP}{ds} = 2,479 > 0\right)$ , але наявність зворотної послідовності призводить до втрати статичної стійкості  $\left(\frac{dP}{ds} = -1,209 < 0\right)$ . Таким

чином, можна зробити висновок, що коли асинхронний двигун знаходиться близько до межі порушення статичної стійкості, наявність напруги зворотної послідовності або внутрішньої несиметрії двигуна можуть бути визначальними при порушенні стійкої роботи навантаження.

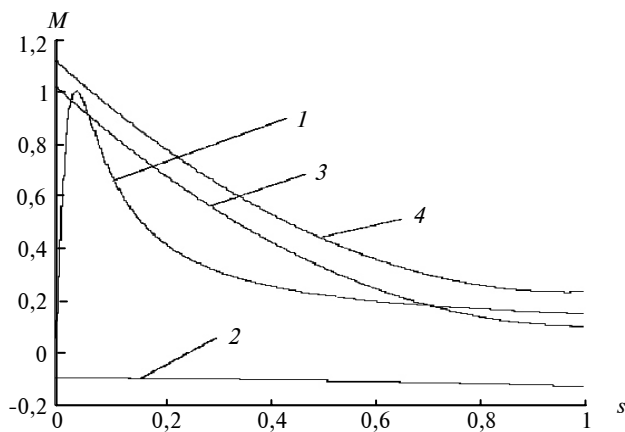


Рис. 3. Механічна характеристика двигуна типу АН-15-64 при нестійкому режимі роботи

Для оцінки впливу несиметричного режиму на статичну стійкість асинхронного двигуна в реальних умовах проведено розкладання двох несиметричних режимів, вимірюваних у мережах промислових підприємств на шинах 6,3 і 0,4 кВ, на симетричні складові. Результати наведено нижче.

1. Несиметрія в мережі промислового підприємства на шинах 6,3 кВ.

Результати замірів лінійних напруг:  $U_{AB} = 6,4$  кВ;  $U_{BC} = 5,81$  кВ;  $U_{CA} = 6,12$  кВ.

Складова напруги прямої послідовності:  $U_1 = 6,11$  кВ,  $U_1^* = 0,97$  відн. од.

Складова напруги зворотної послідовності:  $U_2 = 0,33$  кВ,  $U_2^* = 0,054$  відн. од.

2. Несиметрія в мережі промислового підприємства на шинах 0,4 кВ.

Результати замірів напруг по трьох фазах:  $U_A = 180$  В;  $U_B = 190$  В;  $U_C = 230$  В.

Складова напруги прямої послідовності:  $U_1 = 200,05$  В,  $U_1^* = 0,909$  відн. од.

Складова напруги зворотної послідовності:  $U_2 = 15,25$  кВ,  $U_2^* = 0,069$  відн. од.

Проаналізувавши ці реальні режими роботи вузлів навантаження промислових підприємств, можна зробити такі висновки:

- у розподільчих мережах промислових підприємств присутня несиметрія трифазної системи напруг внаслідок великої кількості однофазного несиметричного навантаження, причому чим нижчим є клас напруги, тим сильніше вона проявляється;

- несиметрія напруги виходить за допустимі норми, вказані в [7]; в мережі 0,4 кВ несиметрія напруги живлення викликає істотне зниження прямої складової напруги, що викликає загрозу порушення статичної стійкості асинхронних двигунів, які становлять основну частину навантаження в заводських мережах 0,4 кВ.

## Висновки

У статті розроблено критерій кількісної оцінки запасу статичної стійкості асинхронного двигуна за наявності несиметрії трифазної системи напруг і проведено аналіз запасу статичної стійкості асинхронного двигуна для різних значень коефіцієнта несиметрії трифазної системи напруг.

Проаналізовано вплив напруги зворотної послідовності на запас статичної стійкості асинхронного двигуна в нормальних та післяаварійних режимах. Отримані результати показали особливу небезпеку напруги зворотної послідовності у важких післяаварійних режимах, коли асинхронний двигун знаходиться близько до межі порушення статичної стійкості.

Проаналізовано реальні режими роботи вузлів навантаження промислових підприємств та виявлено, що несиметрія напруг істотно

проявляє себе в цих мережах у нормальних режимах і різко зростає в післяаварійних режимах, що небезпечно насамперед для двигунів,

які відпрацювали свій ресурс та мають внутрішню несиметрію.

В.В. Литвинов

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ИХ СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Исследована статическая устойчивость асинхронных двигателей при пониженном качестве питающего напряжения и неудовлетворительном техническом состоянии двигателя. Для оценки статической устойчивости асинхронного двигателя использовался критерий устойчивости асинхронного двигателя  $\frac{dP}{ds}$ . Полученные результаты показали, что несимметрия напряжения асинхронного двигателя негативно влияет на статическую устойчивость асинхронной нагрузки тем, что снижает составляющую прямой последовательности напряжения и является наиболее опасной, когда асинхронный двигатель находится в режиме, близком к пределу нарушения устойчивости.

V.V. Litvinov

INFLUENCE OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY AND TECHNICAL CONDITIONS OF INDUCTION MOTORS ON THEIR STATIC STABILITY

The paper provides insights into the research of static stability of induction motors at a low-quality supply voltage and an unsatisfactory technical condition of the motor. The  $\frac{dP}{ds}$  criterion of static stability of the induction motor was used to assess its static stability. The results obtained show that a non-symmetric voltage has a negative influence on the static stability of the induction motor by decreasing the component of a positive-sequence voltage. The non-symmetric voltage is considered the most dangerous when the induction motor operates in the mode, close to the margin of a static stability loss.

1. *Ершов М.С., Егоров А.В., Яценко Д.Е.* О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки промышленных предприятий // Промышленная энергетика. — 1997. — № 5. — С. 26–28.
2. *Гусаров А.А.* Влияние качества электрической энергии на тепловое состояние трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. — 2008. — Вип. 8 (140). — С. 95–97.
3. *Пинчук О.Г.* Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения // Там же. — С. 201–204.
4. *Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А.* Устойчивость нагрузки электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 208 с.
5. *Постников И.М.* Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. — М.: Высш. шк., 1975. — 320 с.
6. *Костерев Н.В., Денисюк П.Л.* Оценивание параметров асинхронной машины // Моделирование и расчет на ЦВМ режимов энергетических систем. — К.: Наук. думка, 1977. — С. 66–75.
7. *ГОСТ 13109–97.* Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.

Рекомендована Радою факультету електроенерготехніки і автоматики НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
11 червня 2009 року